

Paket Wavelet Coifman Biorthogonal (PWCB) untuk Kompresi Citra Diam : Perbandingan dengan Paket Wavelet Coifman Orthogonal (PWCO)

Rismon Hasiholan Sianipar & Sjamsjiar Rachman

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram

e-mail: r.sianipar@telkom.net

Abstrak

Citra digital telah lama menggeser peran citra analog seperti citra foto atau citra sinar x. Dalam bentuk asli, citra memerlukan kapasitas memori yang sangat besar untuk penyimpanan dan lebar-bidang yang besar untuk transmisi. Dalam dua dekade terakhir, sejumlah peneliti telah mengembangkan teknik-teknik kompresi mutakhir. Wavelet telah menjadi teknologi acuan untuk kompresi citra. Pada paper ini, algoritma dekomposisi citra berbasis paket wavelet Coifman biorthogonal telah diimplementasikan termasuk teknik *thresholding* tidak seragam berbasis intensitas piksel dalam sub-bidang citra. Hasil percobaan diperoleh untuk membandingkan wavelet-wavelet biorthogonal Bcoif2, Bcoif3, dan Bcoif4 atas beberapa citra uji menggunakan parameter rasio kompresi (CR) dan PSNR. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa PSNR dari PWCB lebih besar dari PWCO.

Kata kunci : paket wavelet, kompresi citra, PWCB, PWCO.

Abstract

Digitized images have replaced analog images as photographs or x-rays in many different fields. In their raw form, digital images require a tremendous memory capacity for storage and large amount of bandwidth for transmission. In the last two decades, many researchers have been devoted to develop new techniques for image compression. More recently, wavelets have become a cutting edge technology for compressing the images by extracting only the visible elements. In this paper a biorthogonal Coifman wavelet packet based image decomposition algorithm has been implemented. Also, a nonuniform threshold technique based on average intensity values of pixels in each sub-band has been proposed to remove the insignificant wavelet coefficients in the transformed image. Experimental results are obtained to compare the BCoif2, BCoif3 and BCoif4 compactly supported (Coifman) biorthogonal wavelets on various test images using two important performance parameters -compression ratio (CR) and PSNR. The result showed that PSNR of PWCB is greater than PWCO.

Keywords : wavelet packet, image compression, PWCB, PWCO.

Pendahuluan

Kompresi citra merupakan hal esensial dalam terapan-terapan seperti transmisi data dan penyimpanan dalam basis data. Tujuannya adalah mengurangi laju bit tanpa menghilangkan kualitas citra secara signifikan. Karakteristik dari kebanyakan citra terkorelasi erat (*highly correlated*) antara satu piksel dengan piksel tetangganya. Topik utama paper ini adalah untuk menemukan representasi citra melalui pendekomrelasian piksel-piksel citra.

Pada tulisan ini akan digunakan wavelet Coifman biorthogonal. Wavelet yang memiliki beberapa kelebihan seperti *compactly supported*, *symmetric* dan kehalusan tingkat tinggi. Sifat-sifat ini sangat diperlukan untuk dekomposisi citra diam [11]. Bahkan kelebihan yang paling atraktif ada-

lah koefisien-koefisiennya yang rasional diadik (semua pembagi kelipatan 2) sehingga menghasilkan algoritma cepat untuk komputer digital.

Algoritma Pruning Optimal dengan kriteria entropi dimanfaatkan untuk menghasilkan paket wavelet Coifman biorthogonal (PWCB) [14]. Meskipun standard internasional untuk kompresi citra diam (*still image*) telah ada yang disebut JPEG [10], yang ditetapkan oleh ISO dan ECE, kinerja pengkode tersebut menurunkan kualitas citra karena berbasis DCT (*discrete cosine transform*) yang terblok 8 x 8. Dalam pengkode berbasis DCT, citra masukan dibagi menjadi blok-blok dan korelasi tiap pinggir blok diabaikan sehingga mengakibatkan artifak pemblokkan yang sangat mengganggu dan kelihatan. Alih-ragam wavelet bisa mengatasi hal ini karena dilakukan tanpa pemblokkan. Pengkodean berbasis wavelet [8] memberikan perbaikan berarti pada kualitas gambar meskipun pada skala rasio kompresi yang lebih tinggi. Hal tersebut

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 November 2002. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 3, nomor 1, Maret 2003.

dikarenakan sifat pemaketan energi dari alih-ragam wavelet sangat baik.

Metode kompresi pada paper ini mencakup pengalih-ragaman wavelet dan teknik *thresholding*. Pengorganisasian paper ini adalah sebagai berikut. Pada bagian 2 akan disajikan wavelet Coifman ortogonal. Pada bagian 3 akan dijelaskan wavelet Coifman biortogonal. Pruning Optimal dan kriteria entropi akan diberikan pada bagian 4. Bagian 5 akan dialokasikan untuk penghitungan *threshold* dan PSNR. Hasil percobaan atas berbagai citra akan didiskusikan pada bagian 6. Akhirnya, kesimpulan akan diakhiri dengan beberapa catatan penting pada bagian 7.

Wavelet Coifman Ortogonal

Alih ragam wavelet diskret (DWT, *discrete wavelet transform*) atas suatu fungsi $f(x)$ dapat dituliskan dengan:

$$DWT(f)(j,k) = 2^{j/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi(2^j x - k) dx \quad (1)$$

dimana $j, k \in \mathbf{Z}$. Teori analisis resolusi-banyak menyatakan bahwa terdapat $\{a_k, k \in \mathbf{Z}\}$ sehingga:

$$f(x) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} a_k \phi(2x - k) \quad (2)$$

dan

$$\psi(x) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} (-1)^k a_{-k+1} \phi(2x - k) \quad (3)$$

selanjutnya $\phi(x)$ dan $\psi(x)$ akan disebut sebagai fungsi penskala dan fungsi wavelet. Algoritma Mallat merelasikan teori wavelet dengan teori tapis.

$$\begin{aligned} c_{j,k} &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) 2^{j/2} \phi(2^j x - k) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) 2^{j/2} \left(\sum_{n \in \mathbf{Z}} a_n \phi(2^{j+1} x - 2k - n) \right) dx \\ &= \sum_{n \in \mathbf{Z}} a_n \int_{-\infty}^{\infty} f(x) 2^{j/2} \phi(2^{j+1} x - 2k - n) dx \\ &= \sum_{n \in \mathbf{Z}} a_n 2^{-1/2} c_{j+1, 2k+n} \\ &= \sum_{n \in \mathbf{Z}} h_n c_{j+1, 2k+n} = \sum_{n \in \mathbf{Z}} h_{n-2k} c_{j+1, n} \end{aligned} \quad (4)$$

dengan cara yang sama akan diperoleh :

$$d_{j,k} = \sum_{n \in \mathbf{Z}} g_{n-2k} c_{j+1, n} \quad (5)$$

Wavelet Coifman merupakan basis ortonormal, yaitu Jika:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) \phi(x-k) dx = \delta_{0,k}, \quad \forall k \in \mathbf{Z} \quad (6)$$

suatu wavelet ortogonal dikatakan wavelet Coifman ortogonal derajat N jika *vanishing moments* dari fungsi penskala $\phi(x)$ dan fungsi wavelet $\psi(x)$ masing-masing derajat N.

$$Mom_p = \int_{-\infty}^{\infty} x^p \phi(x) dx = \delta_{0,p} \text{ untuk } p = 0, \dots, N \quad (7)$$

$$Mom_p = \int_{-\infty}^{\infty} x^p \psi(x) dx = \delta_{0,p} \text{ untuk } p = 0, \dots, N$$

Derajat *vanishing moments* ini merupakan parameter untuk menyatakan kemampuan mengaproksimasi suatu isyarat. Semakin besar jumlah *vanishing moments* suatu fungsi basis, maka akan semakin kecil galat aproksimasi yang akan terjadi. Bahkan jika *vanishing moments* yang besar dimiliki oleh kedua fungsi penskala dan fungsi wavelet sekaligus maka galat aproksimasi akan jauh semakin kecil. Hal inilah yang merupakan sifat kunci dari wavelet Coifman orthogonal yang merupakan perbaikan dari wavelet Daubechies [14].

Wavelet Coifman Biorthogonal

Dalam sistem wavelet biorthogonal, fungsi dekomposisi dan rekonstruksi masing-masing berbeda. Persamaan ekspansi suatu isyarat $f(x)$ dapat dituliskan dengan:

$$f(x) = \lim_{J \rightarrow \infty} \sum_{j=-J}^J \sum_k \langle f, \psi_{j,k} \rangle \tilde{\psi}_{j,k} \quad (8)$$

Pada sistem ini dikenal dua jenis vektor: vektor analisis $\{a_k, k \in \mathbf{Z}\}$ dan vektor sintesis $\{\tilde{a}_k, k \in \mathbf{Z}\}$ dan memenuhi persyaratan bilinear:

$$\sum_{k \in \mathbf{Z}} a_k \tilde{a}_{k+2l} = 2\delta_{0,l}, \quad \forall l \in \mathbf{Z} \quad (9)$$

selanjutnya dapat dituliskan fungsi wavelet $\psi(x)$ dan fungsi dualnya, $\tilde{\psi}(x)$:

$$\begin{aligned} \psi(x) &= \sum_{k \in \mathbf{Z}} (-1)^k \tilde{a}_{-k+1} \phi(2x - k), \\ \tilde{\psi}(x) &= \sum_{k \in \mathbf{Z}} (-1)^k a_{-k+1} \tilde{\phi}(2x - k), \end{aligned} \quad (10)$$

Kondisi-kondisi yang harus dipenuhi oleh wavelet biorthogonal adalah [8]:

$$\langle \tilde{\psi}_{jl}, \psi_{j'l'} \rangle = \delta_{l-l'}, \quad l, l', j \in \mathbf{Z} \quad (12)$$

$$\langle \tilde{\psi}_{jl}, \psi_{j'l'} \rangle = \delta_{j-j'} \delta_{l-l'}, \quad l, l', j, j' \in \mathbf{Z} \quad (13)$$

Suatu sistem wavelet biortogonal dikatakan wavelet biorhogonal Coifman jika dan hanya jika memenuhi dua kondisi berikut ini [14]:

1. *Vanishing moments* dari fungsi penskala dual $\tilde{f}(x)$ dan fungsi wavelet dual $\tilde{\psi}(x)$ masing-masing derajat N:

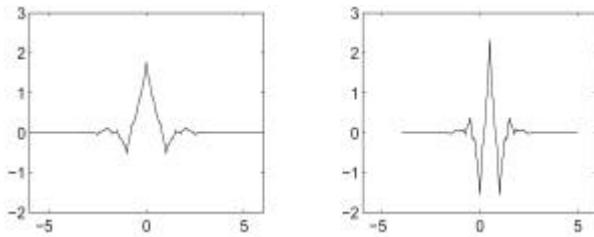
$$Mom_p = \int_{-\infty}^{\infty} x^p \tilde{f}(x) dx = d_{0,p} \text{ untuk } p=0, \dots, N \quad (14)$$

$$Mom_p = \int_{-\infty}^{\infty} x^p \tilde{\psi}(x) dx = 0 \text{ untuk } p=0, \dots, N \quad (15)$$

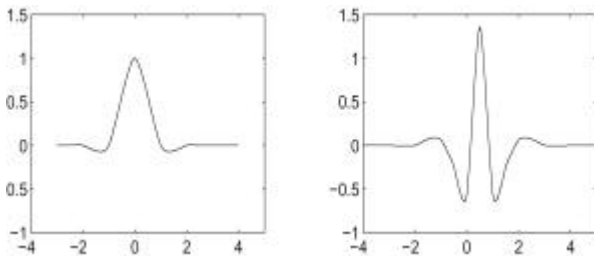
2. *Vanishing moments* fungsi wavelet $\psi(x)$ berderajat N:

$$Mom_p = \int_{-\infty}^{\infty} x^p \psi(x) dx = 0 \text{ untuk } p=0, \dots, N \quad (16)$$

Runtun tapis dual $\tilde{c}_{j,k}$ dan $\tilde{d}_{j,k}$ dapat dikonstruksi dengan memanfaatkan persamaan (9), (12), dan (13) dengan persyaratan *vanishing moments* pada persamaan (14), (15) dan (16) [11]. Grafik fungsi penskala dan fungsi wavelet untuk proses dekomposisi dan rekonstruksi berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Koefisien-koefisien vektor analisis dan sintesis juga ditabulasikan pada Tabel 1.



Gambar 1. Fungsi Penskala Analisis dan Fungsi Wavelet Analisis Derajat 3



Gambar 2. Fungsi Penskala Sintesis dan Fungsi Wavelet Sintesis Derajat 3

Ada beberapa sifat penting wavelet Coifman biortogonal antara lain *compact support*, simetri dan kehalusan. Berikut adalah penjelasan dari sifat-sifat ini.

1. *Compact support*

Sifat ini menyatakan bahwa vektor analisis a_k dan vektor sintesis \tilde{a}_k memiliki panjang yang berhingga. Sifat ini merupakan sifat umum yang dimiliki oleh wavelet ortogonal lainnya.

2. *Simetri*

Sifat ini adalah salah satu sifat kunci dari wavelet Coifman biortogonal yang tidak dimiliki oleh wavelet ortogonal lain kecuali wavelet Haar dan sangat penting untuk pengolahan citra digital terutama untuk mengurangi efek tepi [11]. Suatu sistem wavelet dikatakan simetri jika memiliki vektor penskala a_k yang simetris.

3. *Kehalusan (Smoothness)*

Sifat ini telah menjadi topik sentral dalam banyak penelitian [14] dan sangat cocok dipakai untuk isyarat-isyarat yang memiliki derajat kehalusan yang tinggi. Derajat kehalusan suatu fungsi dihitung menggunakan Teorema Embedding Sobolev [11]. Teorema ini menunjukkan bahwa derajat *vanishing moments* berbanding lurus dengan tingkat kehalusan wavelet [11].

1. Wavelet Coifman 2D

Dalam Wavelet Coifman biorthogonal 2D dikenal 8 operator-operator konvolusi-desimasi. Dekomposisi dilakukan pada dimensi baris dan kolom suatu citra $v(x,y)$ secara bertahap. Proses dekomposisi ini dapat dituliskan dalam persamaan di bawah ini [10].

$$F_0 = H_0 \oplus H_0, F_0 v(x,y) = \sum_{i,j} v(i,j) c_{2x+i} c_{2y+i} \quad (17)$$

$$F_1 = H_0 \oplus H_1, F_1 v(x,y) = \sum_{i,j} v(i,j) c_{2x+i} d_{2y+i} \quad (18)$$

$$F_2 = H_1 \oplus H_0, F_2 v(x,y) = \sum_{i,j} v(i,j) d_{2x+i} c_{2y+i} \quad (19)$$

$$F_3 = H_1 \oplus H_1, F_3 v(x,y) = \sum_{i,j} v(i,j) d_{2x+i} d_{2y+i} \quad (20)$$

Operator-operator di atas memiliki pasangan dual yang berguna untuk proses rekonstruksi citra [10].

$$\tilde{F}_0 v(x,y) = \sum_{i,j} v(i,j) \tilde{c}_{2i+x} \tilde{c}_{2j+y} \quad (21)$$

$$\tilde{F}_1 v(x,y) = \sum_{i,j} v(i,j) \tilde{c}_{2i+x} \tilde{d}_{2j+y} \quad (22)$$

$$\tilde{F}_2 v(x,y) = \sum_{i,j} v(i,j) \tilde{d}_{2i+x} \tilde{c}_{2j+y} \quad (23)$$

$$\tilde{F}_3 v(x,y) = \sum_{i,j} v(i,j) \tilde{d}_{2i+x} \tilde{d}_{2j+y} \quad (24)$$

Dalam orthogonal, operator-operator F_0, F_1, F_2, F_3 juga berfungsi sebagai pasangan dualnya.

Algoritma Pruning Optimal Dan Kriteria Entropi

Pada tulisan ini, kriteria yang digunakan ialah entropi untuk minimisasi *information cost functional*. Entropi suatu runtun $u=\{u(k)\}$ didefinisikan dengan [8] :

$$C(u) = \sum_k p(k) \log \frac{1}{p(k)} \quad (25)$$

$$\text{dengan } p(k) = \frac{|u(k)|^2}{\|u\|^2}$$

sehingga *information cost functional* untuk vektor tersebut yang dikenal sebagai *Shannon entropy* adalah [8]:

$$l(u) = \sum_k |u(k)|^2 \log \left(\frac{1}{|u(k)|^2} \right) \quad (26)$$

Algoritma Pruning Optimal dipakai untuk menyeleksi pohon dekomposisi dalam menghasilkan (PWCB):

```

For  $k=(-L+1):1:0$ 
  For  $n=0$  to  $2^k-1$ 
    Langkah 1: hitung  $R_{k,n} = M(A_{k,n})$ 
    [#  $M$  adalah information cost functional]
    Langkah 2: If  $k=-L+1$ , beri tanda pada
       $R_{k,n}$  sebagai terminal
    Langkah 3: If  $k < -L+1$ ,
      If  $R_{k,n} \leq R_{k+1,2n} + R_{k+1,2n+1}$ 
        Beri tanda pada  $R_{k,n}$  sebagai
        terminal
      Else tinggalkan  $R_{k,n}$  tanpa
      tanda dan Tetapkan nilai  $R_{k,n} = R_{k+1,2n} + R_{k+1,2n+1}$ 
    End
  End
End

```

Dalam referensi [14] akan ditemukan penjelasan lebih rinci tentang penggunaan algoritma ini untuk menghasilkan PWCB.

Penghitungan Threshold dan PSNR

Sifat utama yang bisa dikenali dari alih-ragam wavelet dalam kompresi citra diam adalah terjadinya distorsi minimum pada citra terekonstruksi meskipun dilakukan penghilangan koefisien-koefisien alih-ragam yang mendekati nol. Padahal, alih-ragam wavelet atas citra akan menghasilkan sejumlah besar subbidang citra yang memiliki magnitudo sangat kecil. Dengan menetapkan *threshold* nonnegatif, entri-entri subbidang citra yang bernilai sangat kecil dapat

dinolkan sehingga menghasilkan matriks sangat jarang [2]. Matriks sangat jarang ini lebih mudah untuk ditransmisikan dan disimpan, bahkan citra hasil rekonstruksi dengan *thresholding* ini memberikan hasil yang dapat diterima secara visual oleh mata.

Teknik *thresholding* tidak seragam yang digunakan dalam paper ini bertujuan untuk meminimumkan distorsi yang terjadi pada citra terekonstruksi. Nilai *threshold* dihitung pada setiap sub-bidang citra PWCB secara terpisah untuk mencari rerata (μ) dan standard deviasi (σ). Jika σ lebih besar dari μ , ditetapkan nilai *threshold* ($2*\mu$), kalau tidak ditetapkan ($\mu-\sigma$).

Dalam kasus kompresi tidak sempurna (*lossy compression*), citra terekonstruksi adalah pendekatan dari citra asli. Meskipun banyak parameter untuk mengkuantifikasi kualitas citra, PSNR (*peak signal to noise ratio*) dianggap merupakan salah satu parameter yang sangat umum untuk melakukannya:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\sigma_e^2} \quad (25)$$

dimana σ_a^2 adalah galat terkuadrat rerata (MSE) yang diberikan oleh:

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{MN} \sum_{t=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (x_{t,j} - \hat{x}_{t,j})^2 \quad (26)$$

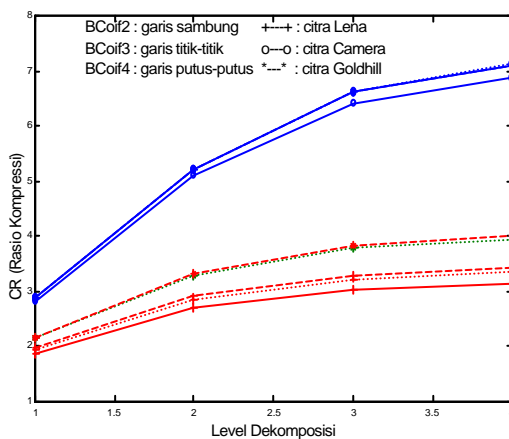
dimana $x[.]$ adalah citra asli dengan dimensi $M \times N$ dan $\hat{x}[.]$ adalah citra terekonstruksi. PSNR yang lebih besar akan menghasilkan kualitas citra yang lebih baik. Untuk mengevaluasi kinerja sistem kompresi citra secara lebih lengkap, rasio kompresi juga akan dilibatkan. Rasio kompresi (CR) dihitung sebagai perbandingan entri-entri tak-nol dari citra asli dengan entri-entri tak-nol dari subbidang citra hasil alih-ragam.

Hasil Percobaan

Eksperimen kompresi citra menggunakan tapis-tapis Coifman biortogonal dilakukan pada 4 level dekomposisi diikuti dengan *thresholding*. Eksperimen ini memakai citra Lena, Camera dan Goldhil yang merupakan citra skala abu-abu dengan 8bpp dan sering digunakan dalam literatur-literatur kompresi [7], lihat Gambar 6. Vektor analisis dan vektor sintesis yang digunakan untuk dekomposisi dan rekonstruksi citra disajikan dalam Tabel 1.

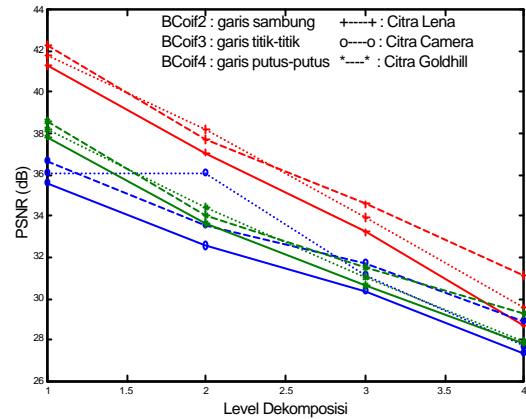
Pada Gambar 3 dan Gambar 4, BCoif2, BCoif3, dan BCoif4 berturut-turut disajikan dalam bentuk garis sambung, garis titik-titik dan garis putus-putus. Citra Lena, Camera dan Goldhill berturut-turut ditandai oleh pemisah +---+, o---o, dan *---*. Tabel 2 menunjukkan hasil PSNR dari citra terekonstruksi pada berbagai level dekomposisi dan Tabel 3 menyajikan rasio kompresi yang tercapai. Nilai-nilai yang ditebalkan merepresentasikan hasil terbaik untuk tiap citra pada setiap level dekomposisi. Hasil numerik pada Tabel 2 menyatakan bahwa PSNR BCoif4 berada di atas yang lain kecuali pada level 2. Tabel 3 juga menunjukkan bahwa CR BCoif4 menempati urutan pertama kecuali pada citra Camera.

Perbandingan PSNR dilakukan untuk membuktikan bahwa teori biorthogonal memang berguna untuk kompresi citra digital. Gambar 5 menyajikan keunggulan PSNR PWCB atas PWCO. Modifikasi atas wavelet orthogonal yang menghasilkan wavelet biorthogonal terbukti cukup berpengaruh. Sifat kunci yang dimiliki wavelet Coifman biorthogonal memegang peranan sangat penting untuk mengangkat nilai PSNR.

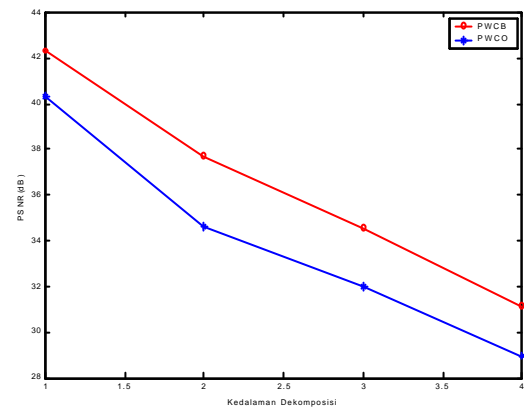


Gambar 3. Rasio Kompresi (CR) vs Level Dekomposisi Menggunakan BCoif2, BCoif3 dan BCoif4 atas beberapa citra

Hasil numerik juga menunjukkan bahwa dengan pertambahan level dekomposisi maka CR akan bertambah dan sebaliknya PSNR akan berkurang.



Gambar 4. PSNR vs Level Dekomposisi Menggunakan BCoif2, BCoif3 dan BCoif4 atas beberapa citra



Gambar 5. PSNR vs Level Dekomposisi untuk PWCB dan PWCO atas Citra Lena



(a)



(b)



(c)

Gambar 6. Citra uji. (a). Citra Lena (b). Citra Camera (c). Citra Goldhill

Tabel 1. Koefisien-Koefisien Vektor Analisis dan Vektor Sintesis untuk PWCB

N	a_k	\tilde{a}_k
2	$a_{-4}=3/64$	
	$a_{-3}=0$	
	$a_{-2}=-3/16$	$\tilde{a}_{-2}=0$
	$a_{-1}=3/8$	$\tilde{a}_{-1}=3/8$
	$a_0=41/32$	$\tilde{a}_0=1$
	$a_1=3/4$	$\tilde{a}_1=3/4$
	$a_2=-3/16$	$\tilde{a}_2=0$
	$a_3=-1/8$	$\tilde{a}_3=-1/8$
	$a_4=3/64$	
	$a_5=0$	
3	$a_{-6}=-1/256$	
	$a_{-5}=0$	
	$a_{-4}=9/128$	
	$a_{-3}=-1/16$	$\tilde{a}_{-3}=-1/16$
	$a_{-2}=-63/256$	$\tilde{a}_{-2}=0$
	$a_{-1}=9/16$	$\tilde{a}_{-1}=9/16$
	$a_0=87/64$	$\tilde{a}_0=1$
	$a_1=9/16$	$\tilde{a}_1=9/16$
	$a_2=-63/256$	$\tilde{a}_2=0$
	$a_3=-1/16$	$\tilde{a}_3=-1/16$
4	$a_4=9/128$	$\tilde{a}_4=0$
	$a_5=0$	
	$a_6=-1/256$	
	$a_7=0$	
	$a_8=15/16384$	
	$a_7=0$	
	$a_{-6}=-35/2048$	
	$a_{-5}=0$	
	$a_{-4}=345/4096$	$\tilde{a}_{-4}=0$
	$a_{-3}=5/128$	$\tilde{a}_{-3}=-5/128$
4	$a_{-2}=-405/2048$	$\tilde{a}_{-2}=0$
	$a_{-1}=15/32$	$\tilde{a}_{-1}=15/32$
	$a_0=10317/8192$	$\tilde{a}_0=1$
	$a_1=45/64$	$\tilde{a}_1=45/64$
	$a_2=-405/2048$	$\tilde{a}_2=0$
	$a_3=-5/32$	$\tilde{a}_3=-5/32$
	$a_4=345/4096$	$\tilde{a}_4=0$
	$a_5=3/128$	$\tilde{a}_5=3/128$
	$a_6=-35/2048$	
	$a_7=0$	
4	$a_8=15/16384$	
	$a_9=0$	

Tabel 2. Hasil PSNR (dalam dB) untuk tiap tapis Coifman biortogonal pada berbagai level dekomposisi

Citra (512 x 512)	Tapis	Level Dekomposisi			
		m=1	m=2	m=3	m=4
Lena	BCoif2	41.3136	37.055	33.2217	28.7348
	BCoif3	41.7716	38.2038	33.9468	29.5029
	BCoif4	42.2978	37.7034	34.5444	31.1425
Camera	BCoif2	35.5824	32.5390	30.3527	27.3485
	BCoif3	36.0399	36.0399	31.0757	27.6581
	BCoif4	36.6611	33.5339	31.7144	28.9178
Goldhill	BCoif2	37.8430	33.6417	30.6188	27.8393
	BCoif3	38.1977	34.3755	31.0307	27.9106
	BCoif4	38.5973	34.0134	31.5011	29.2751

Tabel 3. Rasio Kompresi (CR) untuk Tiap Tapis Coifman Biortogonal pada Berbagai Level Dekomposisi

Citra (512 x 512)	Tapis	Level Dekomposisi			
		m=1	m=2	m=3	m=4
Lena	BCoif2	1.8620	2.6895	3.0192	3.1167
	BCoif3	1.9439	2.8395	3.2203	3.3368
	BCoif4	1.9617	2.8936	3.2938	3.4208
Camera	BCoif2	2.8143	5.1009	6.4091	6.8502
	BCoif3	2.8778	5.2097	6.6182	7.1054
	BCoif4	2.8533	5.1979	6.6046	7.1035
Goldhill	BCoif2	2.1242	3.2669	3.7735	3.9293
	BCoif3	2.1421	3.2634	3.7776	3.9394
	BCoif4	2.1512	3.3085	3.8390	4.0126

Kesimpulan

Pada penelitian ini dilakukan implementasi teknik dekomposisi dan rekonstruksi citra berbasis wavelet Coifman biortogonal yang diikuti dengan *thresholding* tidak seragam sederhana. PSNR dan CR diperoleh untuk beberapa citra pada berbagai level dekomposisi menggunakan tapis-tapis Coifman biortogonal. Bcoif4 yang merupakan wavelet Coifman biortogonal yang memiliki tingkat kehalusan paling tinggi mampu memberikan PSNR paling tinggi kecuali pada level 2. CR yang dicapai Bcoif4 lebih tinggi dari yang lain kecuali pada citra Camera. Ini menunjukkan bahwa PWCB menggunakan Bcoif4 lebih unggul dari yang lain tapi tidak untuk semua level dekomposisi dan semua citra. Grafik perbandingan PSNR menunjukkan bahwa PWCB menempatkan diri di urutan pertama.

Daftar Pustaka

- [1]. Cohen, I. Daubechies and J. C. Feauveau, 1992, "Biorthogonal bases of compactly supported wavelets," Comm. Pure and Applied Mathematics, vol. XLV, pp. 485-560.
- [2]. E. J. Stollnitz, T. D. DeRose and D. H. Salesin, 1995, "Wavelets for computer graphics: a primer, part I," IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 15, No. 3, pp. 76-84.
- [3]. F. G. Meyer, A. Z. Averbuch and J. Stromberg, 2001, "Fast adaptive Wavelet Packet Image Compression," IEEE Trans. Image prcessing, vol. 9, No. 1, pp. 792-800.
- [4]. J. C. Goswami and A. K. Chan, 1999, Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms, and Applications. John Wiley & Sons.
- [5]. K. R. Rao and P. Yip, 1990, "Discrete Cosine Transforms – algorithms, advantages, applications", Academic Press.
- [6]. M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies, 1992 "Image Coding using Wavelet Transform," IEEE Trans. Image Processing, vol. 1 No. 2, pp. 205-220.
- [7]. M. B. Martin and A. E. Bell, 2001, "New image compression techniques using multiwavelets and multiwavelet packets," IEEE Trans. Image prcessing, vol. 10, No. 4, pp. 500-510.
- [8]. M. Vattereli and J. Kovacevic, 1995, "Wavelets and Subband Coding", Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1995.
- [9]. O. Egger, P. Fleury, T. Ebrahimi and M. Kunt, 1999, "High-performance compression of visual information-A tutorial review-part I: Still pictures," in Proc. IEEE, vol. 87, no. 6.
- [10]. Shaobing Scott Chen, 1995., "Basis Pursuit", Ph.D thesis, Stanford University.
- [11]. Tian Jun, 1996., "The Mathematical Theory and Applications of Biorthogonal Coifman Wavelet Systems", Ph.D thesis., Rice University.
- [12]. W.B. Pennebaker, and J.L. Mitchell, 1993, "JPEG-Still Image Data Compression Standards", Van Nostrand Reinhold.
- [13]. Wickerhauser., 2000, "Comparison of Picture Compression Methods: Wavelet, Wavelet Packet, and Local Cosine Transform Coding", Washington University, USA.
- [14]. Wickerhauser, M.V,1994., "Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software", IEEE PRESS., Massachusetts.